

Primena SFRA metode za analizu geometrije aktivnog dela transformatora

Denis Ilić^{1,2}, Saša Milić¹, Đorđe Jovanović¹

¹Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

denis.ilic@ieent.org

²Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Kratak sadržaj: Namotaji energetskih transformatora su u pogonu neprekidno izloženi elektromehaničkim naprezanjima i vibracijama. Usled velikih prenapona, tokom atmosferskih pražnjenja ili kratkih spojeva, može doći do slabljenja mehaničke strukture za utezanje jezgra i namotaja. Bilo kakvo narušavanje projektovane geometrije namotaja umanjice njegovu sposobnost da podnese naredno prenaprezanje, što može dovesti do velike deformacije namotaja. U radu je prikazana analiza frekvencijskog odziva (Sweep Frequency Response Analysis-SFRA) dva tipa transformatora: energetskog transformatora i transformatora koji se koristi u napajanjima električnih uređaja mrežnog napona od 220V. Prikazani su laboratorijski rezultati primene SFRA metode za narušenu geometriju transformatora

Ključne reči: analiza frekventnog odziva, transformator, SFRA metoda, deformacije jezgra i namotaja.

1. Uvod

Besprekidno napajanje električnom energijom ima veliki uticaj na pravilno funkcionisanje modernog društva. U lancu proizvodnje i prenosa električne energije do krajnjeg potrošača, generatori i transformatori predstavljaju osnovne činioce. Svaki kvar na energetskom transformatoru, pored troškova, često dugotrajne, popravke i potencijalnog ugrožavanja okolne opreme, može da preraste u požar ili eksploziju.

Ovaj rad i sa aspekta tehnookonomske analize ima za cilj da opravda uvođenje SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) ispitne metode, kao standardne ispitne metode u eksploatacionoj proceduri (periodika, program ispitivanja, upoređivanje podataka, procena stanja, procena životnog veka...). Metoda je pogodna za utvrđivanje defekata u geometriji aktivnog dela

transformatora pri redovnim profilaktičkim ispitivanjima, na terenu ili nakon transporta, u fabrici ili laboratoriji. Pokazala se kao izuzetno pouzdana i efikasna, pre svega zbog svoje jednostavnosti i ponovljivosti merenja.

2. Tehnički aspekt i opravdanost primene SFRA metode

Pri projektovanju energetskih transformatora, uvažavaju se potencijalna povremena mehanička prenaprezanja do kojih može doći u normalnom pogonu: elektromagnetne sile, vibracije, kratak spoj u mreži, temperaturne razlike, mehaničke sile i vibracije koje se javljaju pri transportu transformatora. Ove sile naprežu namotaje i mogu izazvati njihove trajne deformacije. Stoga su namotaji transformatora mehanički utegnuti. Ukoliko je projektovana geometrija namotaja narušena, odnosno, ako dođe do oštećenja konstrukcije za utezanje namotaja i jezgra, sposobnost transformatora da podnese svaki sledeći udar je uveliko oslabljena.

Česti su problemi energetskih transformatora usled njihove starosti, odnosno dugog veka eksploatacije jer su, potencijalno, već bili elektromehanički prenapregnuti tokom njihovog rada. Veliki izazov predstavlja utvrđivanje stvarnog stanja geometrije namotaja i preventivno otklanjanje mogućih uzroka velikih kvarova.

Deformacije namotaja, međuzavojni kratki spojevi i slično, mogu se uočiti vizuelno, kroz revizione otvore transformatora. Međutim, ovo je prilično zahtevan, dugotrajan i skup zahvat. Potrebno je potpuno ili delimično istočiti ulje iz transformatora. Nakon toga se otvaraju revizioni otvori i vrši vizuelni pregled aktivnog dela transformatora. Ovakav način lociranja kvara u namotaju transformatora sa sobom nosi niz rizika i mana. Deo čvrste izolacije dolazi u dodir sa vlažnim vazduhom iz okoline, te može doći do povećanog ovlaživanja celulozne izolacije. Vidno polje je ograničeno veličinom otvora. Postoji mogućnost da kvar ne bude uočen (moguće je videti samo mali deo namotaja i delova za utezanje jezgra i odstojnika). Usled pomenutog nedostatka, najčešće je potrebno vađenje kompletnog aktivnog dela transformatora, kako bi se ustanovio kvar [1].

SFRA je potpuno neinvazivna, brza i jednostavna metoda kojom se mogu bliže utvrditi, pratiti i lokalizovati nepravilnosti u geometriji namotaja i jezgra transformatora. Pomenuta metoda predstavlja značajan napredak u ispitivanju transformatora [2, 3]. Metoda ne zahteva nikakvu posebnu pripremu transformatora (otvoranje i sl.) osim njegovog isključenja sa mreže i razvezivanja priključaka. Ideja o korišćenju frekventnog odziva namotaja začeta je 1970-ih godina u Kanadi, a zatim je razvoj nastavljen u Engleskoj [4].

Tehnika analize frekvencijskog odziva posmatra transformator kao impedansu u vidu mreže raspodeljenih RLC parametara. Parametar R predstavlja sve aktivne otpore: omski otpori bakra namotaja, otpori koji predstavljaju dielektrične gubitke u izolaciji i otpori koji predstavljaju gubitke usled vihornih struja. Parametar L predstavlja međusobne induktivnosti

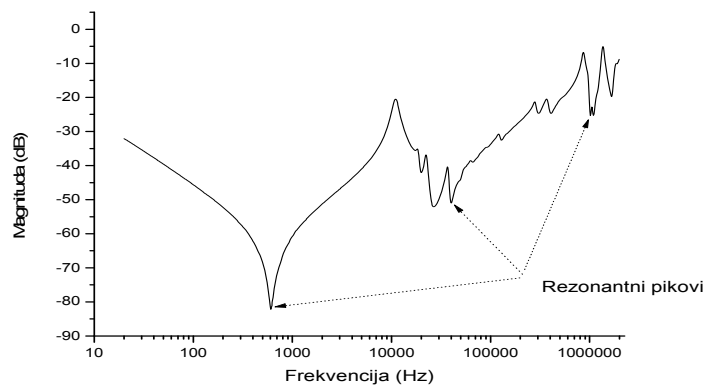
između namotaja i samoinduktivnosti pojedinačnih namotaja. C predstavlja kapacitivnosti između navojaka istog namotaja, kapacitivnosti između navojaka dva različita namotaja i kapacitivnosti navojaka prema uzemljenim delovima [1, 2, 3, 4].

Vrednosti ovih RLC parametara su tačno definisane zajedničkom geometrijom namotaja, jezgra i suda transformatora, kao i osobinama upotrebljenih materijala. Ekvivalentni RLC elementi formiraju brojna redna i paralelna rezonantna kola koja definišu oblik frekventnog odziva namotaja. Ukoliko se na bilo koji način izmeni prvobitna geometrija ili se usled procesa starenja izmene osobine materijala u transformatoru, promeniće se i vrednosti ovih parametara. I najmanja promena nekog od RLC parametara usloviće izobličenje frekventnog odziva.

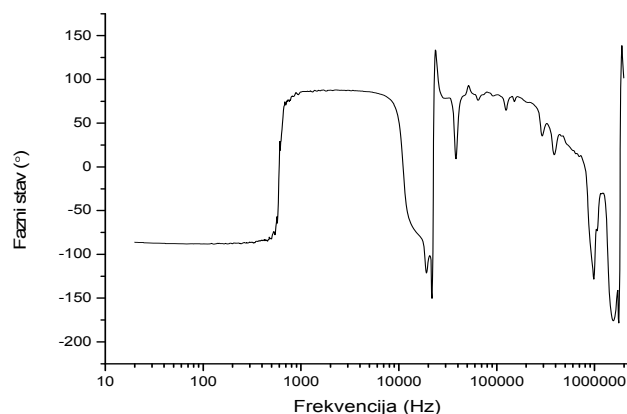
SFRA metoda kao pobudni signal koristi prostoperiodične, sinusoidalne signale promenljive frekvencije. Snimanje frekventnog odziva namotaja izvodi se tako što se na jednom kraju namotaj pobuđuje signalom promenljive frekvencije. Istovremeno se na drugom kraju namotaja vrši merenje signala. Odnos izlaznog signala i ulaznog signala se proračunava unutar definisanog spektra frekvencija, sa odgovarajućom rezolucijom odabiranja učestanosti pobudnog signala [5].

IFRA metoda (Impulse Frequency Response Analysis) je slična SFRA metodi, a za pobudu koristi naponski impuls, amplitude najčešće nekoliko stotina volti, koji se injektira u jedan kraj namotaja. Istovremeno se na drugom kraju namotaja snima promena u vremenu izlaznog strujnog ili naponskog signala. Nad izlaznim signalom se vrši Furijeova transformacija sa ciljem analize harmonika, a zatim se izračunava prenosna karakteristika.

Zavisnost amplitude transmitanse od frekvencije se obično predstavlja grafički, u cilju veće preglednosti i jednostavnijeg opažanja bilo kakvih neregularnosti (slika 1). Na slici 2 je prikazana fazna karakteristika frekventnog odziva istog namotaja. Trenutno je pri analizi dobijenih frekventnih odziva izraženija upotreba amplitudskih karakteristika. Tehnike dobijanja kvalitetnih informacija o integritetu namotaja iz faznih karakteristika se neprestano razvijaju [2, 5, 7].



Slika 1. Primer amplitudske k-ke frekventnog odziva jedne faze VN namotaja transformatora sprege Ynd



Slika 2. Primer fazne k-ke frekventnog odziva jedne faze VN namotaja transformatora sprege Ynd

3. SFRA u praksi

SFRA metoda se pokazala pogodnom pri:

- fabričkim testiranjima
- eksploatacionim (pogonskim) uslovima
- laboratorijskim uslovima

Tokom proizvodnog ciklusa, u fabričkim ispitivanjima, SFRA metoda se koristi kao afirmativna metoda kojom se proveravaju karakteristike svakog novoproducenog transformatora iz iste serije u cilju detekcije neželjenih odstupanja. Pre otpremanja transformatora poželjno je snimiti referentni odziv

namotaja, tzv. „*fingerprint*“. Ovaj referentni odziv koristiće se kao osnova svih budućih ispitivanja.

Metoda analize frekventnog odziva, SFRA, koristi niske napone [1, 2, 3, 4], što dozvoljava snimanje odziva namotaja bez prethodnog ulivanja ulja u transformator. Primena SFRA ne uslovljava montažu originalnih VN izolatora, već se u svrhe snimanja odziva, pre nego što se transformator otpremi iz fabrike, mogu montirati mali, pomoćni izolatori. Na ovaj način je moguće snimiti odzive namotaja pre i nakon transporta, te njihovim poređenjem utvrditi da li je i kojoj meri došlo do povrede geometrije aktivnog dela transformatora.

Pri merenjima u eksploatacionim (pogonskim) uslovima na terenu, metoda SFRA se koristi kako bi se utvrdile moguće deformacije nastale tokom intervencija na transformatoru ili posle nekog eksploatacionog perioda za koji se sumnja da je u toku njega bilo značajnih poremećaja (kratki spojevi, velike vibracije...). U toku eksploatacije, moguće su incidentne situacije poput bliskog kratkog spoja, odnosno bilo kakvih seizmičkih i sličnih pojava koje mogu ugroziti integritet aktivnog dela transformatora. Merenja se preporučuju i prilikom redovnih profilaktičkih ispitivanja transformatora, kako bi se blagovremeno uočili novonastali defekti na namotaju ili jezgru.

Neophodno je, pre početka snimanja frekventnih odziva namotaja izvršiti adekvatnu pripremu energetskog transformatora. Pod pripremom se podrazumeva kompletno razvezivanje svih priključaka transformatora i osiguranje kvalitetnog uzemljenja transformatorskog suda.

Frekventni opseg pobudnog signala koji se primenjuje je u granicama između 20 Hz i 2 MHz. Ograničenje gornje granice frekventnog opsega na 2MHz uslovljeno je pre svega velikim dimenzijama visokonaponskih provodnih izolatora velikih blok transformatora odnosno njihovim rasipnim kapacitetom prema okolini.

Na manjim distributivnim transformatorima moguće je pomeriti gornju frekventnu granicu ispitnog (pobudnog) napona do 5MHz, ali je svrsishodnost tako dobijenih podataka diskutabilna. Amplituda primenjenog prostoperiodičnog napona je od 5 V_{pp} do 24 V_{pp} , ovisno o proizvođaču uređaja. SFRA uređaj meri frekventni odziv samo na jednoj frekvenciji u svakom trenutku. Posle promene frekvencije pobudnog signala (cilj je da se izvrši merenje u celom frekventnom opsegu), potrebno je obezbediti mrtvo vreme merenja u trajanju najmanje jednog ciklusa prostoperiodičnog pobudnog signala da bi se izbegli prelazni režimi uzrokovani promenom frekvencije.

Jedna od mana SFRA metode je osetljivost na elektromagnetne smetnje. Kako bi se nepovoljni uticaji elektromagnetskih smetnji u što je moguće većoj meri umanjili potrebno je obezbediti kvalitetno uzemljenje ekrana mernih kablova uređaja. Moderni merni SFRA uređaji vrše „self test“ pre svakog merenja kako bi se utvrdilo da su ekrani zadovoljavajuće uzemljeni.

Prilikom merenja posebna pažnja treba biti posvećena karakterističnim impedansama mernih kablova i ulaznoj impedansi mernog uređaja. U cilju stvaranja najpogodnijih uslova merenja, karakteristična impedansa mernih

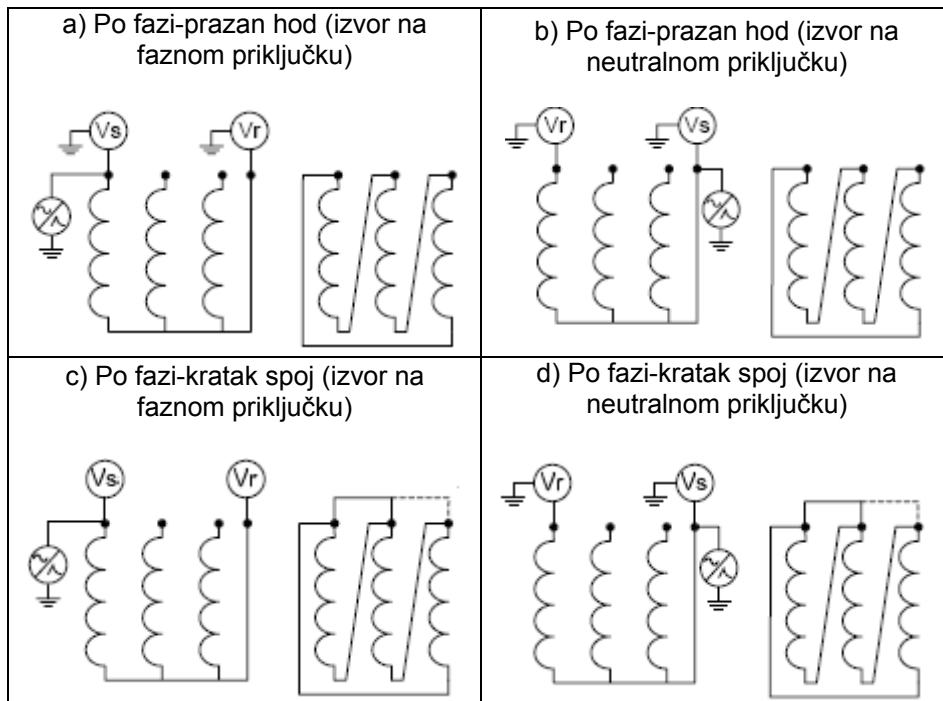
kablova mora biti prilagođena ulaznoj impedansi mernog uređaja (obično se usvaja vrednost od 50Ω).

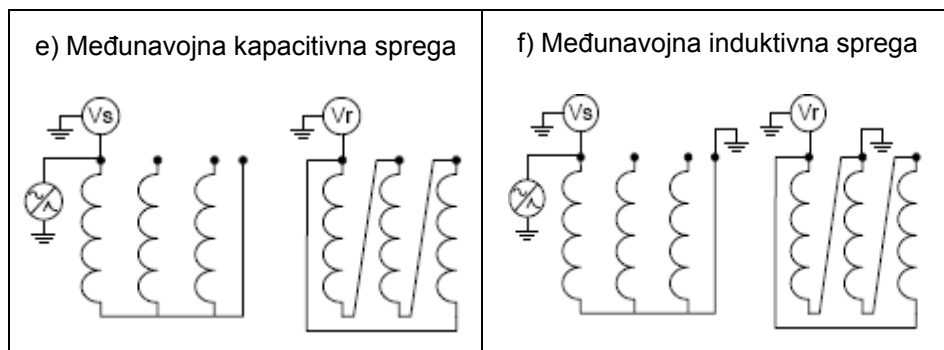
SFRA odzivi se snimaju posebno za namotaj svake od faza i to najčešće prema dve principijelno različite šeme merenja [1, 2, 6, 7, 8]:

1. merenje prema šemi praznog hoda i
2. merenje prema šemi kratkog spoja

Merenje u šemi praznog hoda se izvodi tako što se na svaki pojedinačni namotaj dovodi signal promenljive frekvencije, dok se sa njegovog drugog kraja signal meri. Pri tome su svi drugi namotaji otvoreni i neuzemljeni, analogno ogledu praznog hoda.

Merenja prema šemi kratkog spoja se vrše tako što je, tokom merenja, drugi namotaj kratko spojen. Ukoliko je namotaj koji je potrebno kratko spojiti spregnut u zvezdu sa izvedenim neutralnim priključkom, potrebno je neutralni priključak, po konvenciji, ostaviti otvorenim ili ga kratko spojiti sa ostalim priključcima.





Slika 3. Šeme veza pri snimanju frekventnog odziva namotaja prema [9]

Snimanje odziva između dva namotaja različitog naponskog nivoa vrši se prema sledeće dve šeme:

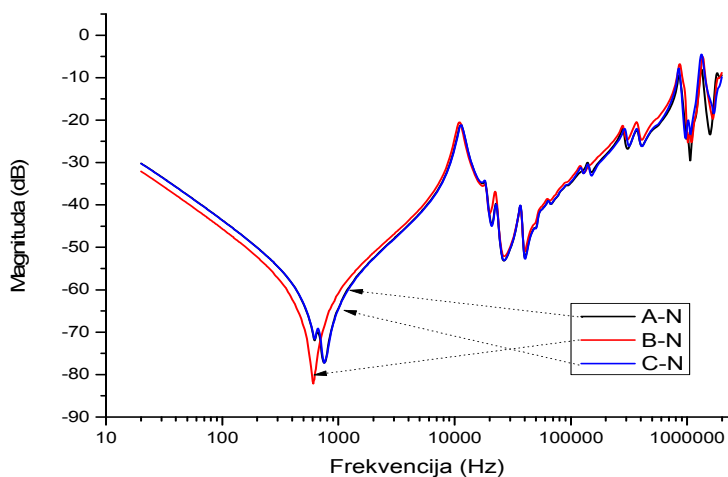
1. kapacitivnoj i
2. induktivnoj.

Odzivi snimljeni u šemi pri kojoj je akcenat na kapacitivnostima (slika 4) izuzetno su osetljivi na radjalne deformacije namotaja, dok je test u induktivnoj međunamotajnoj šemi (slika 4) na nižim frekvencijama predstavlja merenje slično merenju prenosnog odnosa transformatora i nije od prevelikog značaja [1].

3.1. Analiza rezultata

Zaključci SFRA analize odziva namotaja se izvlače poređenjem odziva. Pri tome, od velikog značaja je postojanje *fingerprint* odziva, odnosno fabričkog snimka transformatora. Metoda je u osnovi poredbeno jer se poredbe dobijena kriva merenja sa krivom za koju se smatra da je dobijena u trenutku kada je transformator bio ispravan. Pri analizi rezultata, različiti frekventni podopsezi su se pokazali različito osetljivim za pojedine kvarove [8].

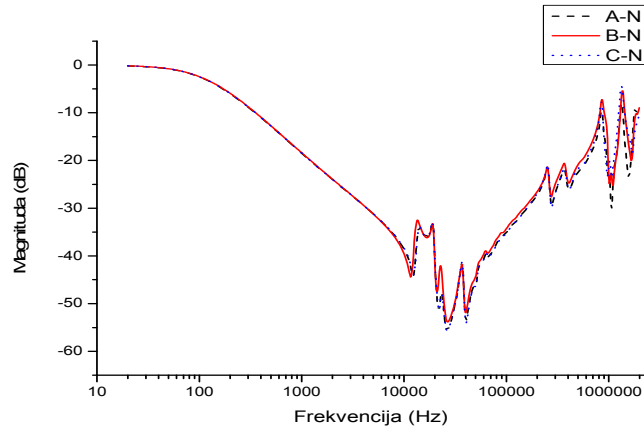
Smatra se da su promene odziva od $\pm 5\text{dB}$ u odnosu na referentni odziv normalne u ulaze unutar granica tolerancije. Iskustva pokazuju da čak i velike promene unutar malog opsega frekvencija nisu pokazatelji potencijalno opasnih kvarova kao što su to promene koje su prisutne na većem delu frekventne ose. Na slici 4 je prikazan odziv sva tri fazna namotaja jednog transformatora 235/15 kV, snage 360 MVA sprege YNd5, u šemi praznog hoda. Očigledno je da se odzivi faze „A“ (crna linija), i faze „C“, (plava linija) odlično poklapaju, dok odziv faze „B“ (crvena linija) odstupa, naročito na nižim frekvencijama.



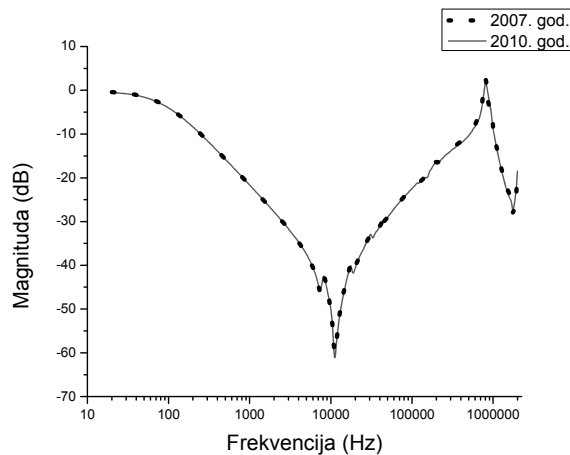
Slika 4. Primer snimljenog odziva sve tri faze VN namotaja sprege YNd, niskonaponski namotaj otvoren.

Odstupanja na nižim frekvencijama, oko 1kHz, karakteristična su za Y spregu namotaja. Uzrok ovog je činjenica da pri nižim frekvencijama pobudnog napona dominantan uticaj na oblik odziva ima jezgro transformatora. Fluksevi faza se mogu zatvarati putanjama različitih dužina kroz jezgro, što na nižim frekvencijama prouzrokuje dve rezonantne tačke (slika 4), ili istom putanjom, što se oslikava kao jedna rezonantna tačka (slika 4). Na slici 5 su prikazani odzivi namotaja istog transformatora snimljeni pri kratko spojenim sekundarnim priključcima. Jasno je da je deo odziva od oko 20 kHz i naviše skoro identičan kao i pri merenju u sprezi praznog hoda. Međutim razlika na nižim učestanostima je drastična, i može navesti na pogrešne zaključke ukoliko se ne poznaje dovoljno unutrašnja struktura transformatora.

Na slici 6 prikazano je poklapanje dva odziva iste faze transformatora snage 63MVA, 110/6.3 kV, sprege YNd5. Prvi odziv, žuta linija, snimljen je prilikom redovnog ispitivanja transformatora 2007 godine, a drugi, isprekidana crna linija, snimljen je 2012. godine. Jasno je da se dve krive savršeno podudaraju, te se može zaključiti da u međuvremenu, od 2007. do 2012. godine ovaj transformator nije pretrpeo nikakve deformacije namotaja.



Slika 5. Primer snimljenog odziva sve tri faze VN namotaja spregnutog u zvezdu, niskonaponski namotaj kratko spojen



Slika 6. Primer poređenja nove frekventne karakteristike faze A-N namotaja spregnutog u zvezdu (puna linija), sa pet godina starijim snimkom (isprekidana linija)

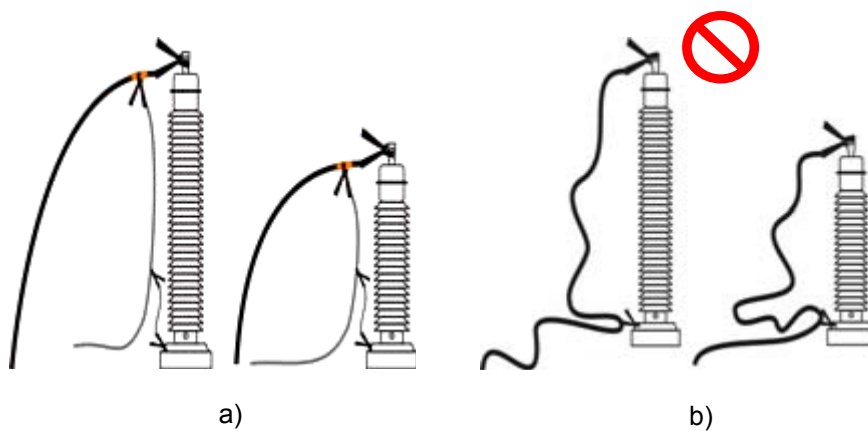
3.2. Ponovljivost merenja

Kao jedna od velikih prednosti dijagnostikovanja stanja geometrije energetskog transformatora SFRA metodom ističe se ponovljivost merenja. Kako bi ponovljivost merenja bila zasigurno očuvana potrebno je ispoštovati sledeće uslove [2, 6, 7]:

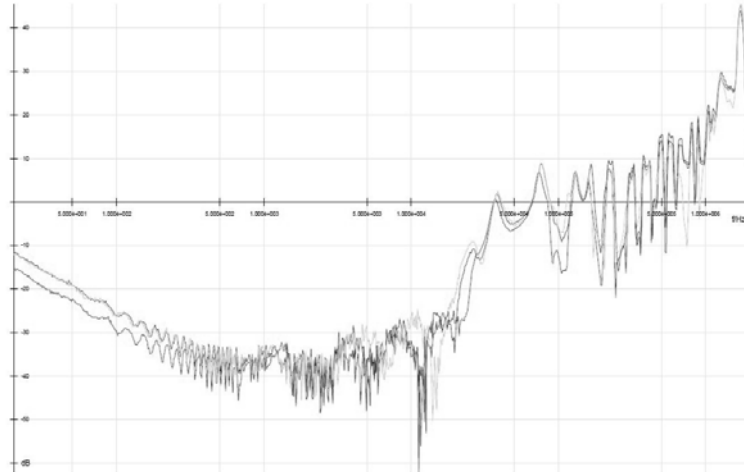
1. Svi priključci transformatora, osim uzemljenja suda, moraju biti uklonjeni

2. Kontakti na priključcima uvodnih izolatora treba da budu očišćeni
3. Klešta ili stege za priključenje instrumenta moraju osigurati pouzdan i kvalitetan električni spoj,
4. Oklopljeni koaksijalni kablovi kojima se vrši priključenje instrumenta na transformator moraju biti iste dužine.
5. Ekрани koaksijalnih kablova ne smeju biti u kontaktu sa priključcima transformatora
6. Produžeci koji služe za uzemljavanje ekrana moraju biti što je moguće kraći i napravljeni od mnogo tankih isprepletanih i međusobno izolovanih žica kako bi se umanjio skin efekat na visokim frekvencijama
7. Priključak za uzemljenje ekrana mora biti naročito kvalitetno spojen na uzemljen sud transformatora
8. Potrebno je voditi detaljnu evidenciju o svakom snimku, kako bi se u budućnosti mogli porediti odzivi

Veliki broj grešaka prilikom merenja nastaje usled neadekvatnog uzemljenja ekrana priključnih kablova. Na slici 7a je prikazan ispravan način povezivanja ekrana sa uzemljenjem (levo), sa najkraćim rastojanjem od mesta priključenja do uzemljenja. Na slici 7b prikazan je neprimeren način uzemljavanja ekrana koji ugrožava pouzdanost merenja. Izuzetno šumoviti odzivi poput odziva prikazanih na slici 8 gotovo sigurno indiciraju loš kontakt sa uzemljenjem.



Slika 7. Prikaz ispravnog uzemljenja ekrana a) i neprimerenog načina b)



Slika 8. Odzivi snimljeni za sve tri faze pri lošim spojevima uzemljivača

4. Impulsna metoda i SFRA- pro et contra

Svaka od metoda snimanja frekventnog odziva transformatora, IFRA i SFRA, ima svoje prednosti i mane [1, 11].

Glavne mane impulsne metode su:

- Rezolucija frekventne ose je fiksna, i na nižim frekvencijama nepovoljna.
- Osetljivost na šum
- Snaga signala injektiranog u transformator se razlikuje, u zavisnosti od frekvencije. Iz tog razloga se i preciznost metode razlikuje duž frekventne ose
- Potrebna oprema (potrebno je imati generator signala, kalem Rogovskog, osciloskop)

Dve osnovne prednosti impulsne metode su:

- Nekoliko prenosnih funkcija se može snimati istovremeno
- Vreme potrebno za svako merenje je najčešće manje od jednog minuta

U poređenju sa impulsnom metodom, SFRA ima sledeće nedostatke:

- Nije moguće snimati više odziva istovremeno. U svakoj iteraciji se snima samo jedna prenosna funkcija.
- Za snimanje pojedinačnog odziva potrebno je nekoliko minuta.

Istovremeno, SFRA poseduje brojne prednosti, koje su joj ujedno i donele svojevrsnu prednost nad impulsnom metodom:

- Veliki odnos signala prema šumu (S/N).
- Širok spektar frekvencija koje se koriste za snimanje odziva

- Moguće je podesiti finu rezoluciju odabiranja frekvencija u nižem frekventnom opsegu. Rezolucija se može potpuno prilagoditi.
- Jednostavnost opreme za ispitivanje. Na tržištu postoji nekoliko različitih uređaja, od kojih neki u sebi sadrže i memoriju i CPU, te ne zahtevaju čak ni posedovanje računara pri merenju, dok se rezultati mogu naknadno radi analize prebaciti na računar.

5. Eksperimentalna analiza

Na eksperimentalnom modelu transformatora biće simulirani nekoliko mogućih deformacija, a zatim nakon svake simulacije sprovede se snimanje frekventnog odziva namotaja kako bi se prikazala osetljivost metode na određene deformacije. Kao model upotrebljen je monofazni transformator sa sledećim podacima:

- Nominalni napon primara 220V
- Nominalni napon sekundara 20V
- Snaga 65VA

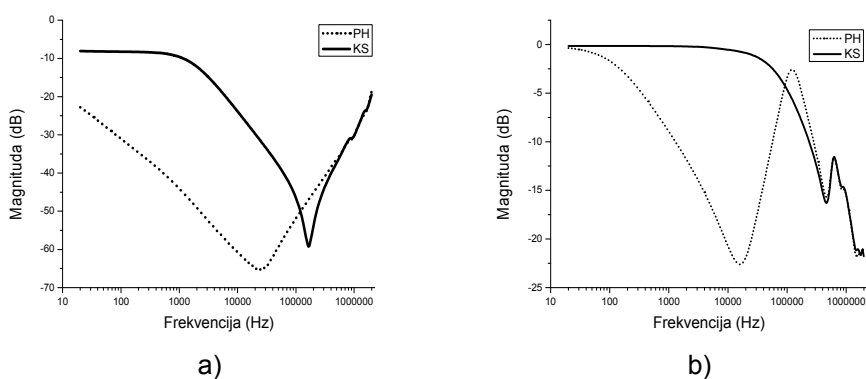
Namotaji su izrađeni od ručno motane bakarne žice izolovane slojem laka. Na slici 9 je data fotografija modela. Očekivano je da se na ovako malom modelu mogu simulirati kvarovi. Međutim, devijacije odziva dobijenih pri simulaciji kvarova biće u većini slučajeva značajno manje, u odnosu na velike energetske transformatore i realne kvarove. Razlog za to se nalazi pre svega u činjenici da se u ovom slučaju razmatraju male dimenzije, te su samim tim i promene mnogo manje. Osim toga, ovaj transformator predstavlja suvi tip transformatora, tj. u njemu ne postoji ulje koje bi dodatno pospešilo izolacione sposobnosti namotaja. U nedostatku ulja, koje ima relativnu dielektričnu konstantu nekoliko puta veću od vazduha, svi kapacitivni elementi koji sačinjavaju ekvivalentnu RLC mrežu transformatora biće značajno manji.

Samim tim će proizvod LC biti manji, što će usloviti pomeranje rezonantnih pikova odziva ka višim frekvencijama. Stoga, potrebno je naglasiti da prethodno navedeni podopsezi frekvencija i njima pridruženi karakteristični kvarovi (Tabela 1) nisu potpuno primenljivi i na ovakav mali monofazni transformator, te ih u ovom slučaju treba uzeti sa rezervom.

Cilj ovih simulacija biće isključivo demonstriranje rada SFRA metode i njenih mogućnosti. Na navedenom transformatoru su najpre snimljeni referentni odzivi namotaja transformatora u praznom hodu (PH) i kratkom spoju (KS) (slika 10). Posle svake simulacije kvara snimljene su razne kombinacije odziva. U radu će biti prikazani odzivi na kojima je simulirani kvar bio najuočljiviji.



Slika 9. Transformator koji je korišćen za simuliranje kvarova



Slika 10. Referentni odzivi: a) napajanje sa VN strane i b) napajanje sa NN strane

Ovi referentni odzivi poslužiće za dalje poređenje sa odzivima dobijenim na modelu nakon načinjenih namernih kvarova. Poređenjem sa referentnim odzivima većih transformatora, više nego očigledan je nedostatak brojnih rezonantnih pikova na višim frekvencijama, kao rezultat malih dimenzija transformatora. Simulirano je sledeće:

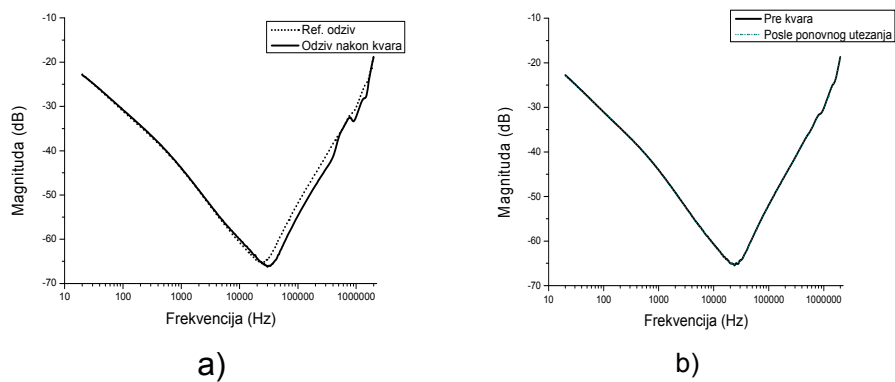
1. Oštećenje jezgra transformatora
2. Porast omskog otpora jednog namotaja
3. Remanentni magnetizam
4. Međuzavojni kratak spoj

1) Magnetno jezgro modela je sastavljeno od oko 70-ak parova E i I dinamo limova sa jedne strane izolovanih slojem laka. Kako bi se pokazalo da je metoda osetljiva na promene u geometriji jezgra, snimljeni su odzivi pri

Odzivi dobijeni na ovaj način predstavljeni su na slici 12a. Odziv nakon izvlačenja nekoliko I segmenata je primetno promenio oblik, naročito u oblasti iznad 10 kHz. Takođe, odziv, dobijen nakon ponovnog utezanja jezgra, identičan početnom referentnom odzivu (Slika 12b). Time je potvrđeno da je jezgro opet u istom stanju kao i pre namernog oštećenja jezgra.

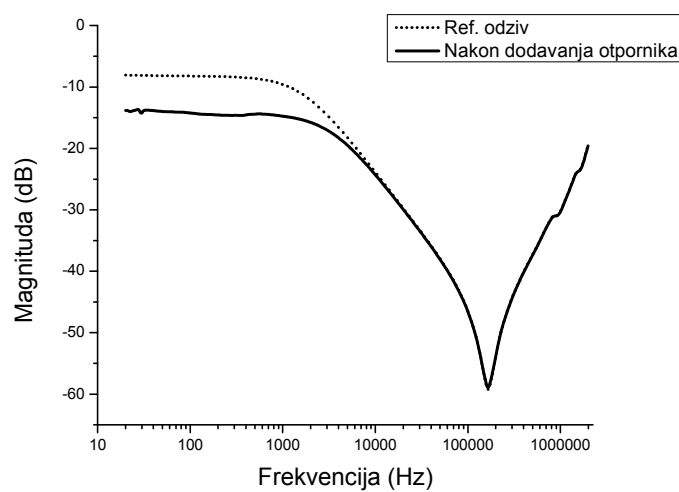


Slika 11. Izvlačenje nekoliko I segmenata



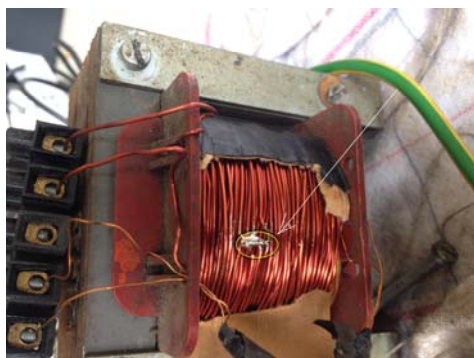
Slika 12. Odziv u sprezi praznog hoda: a) pri oštećenom jezgru i b) nakon ponovnog utezanja jezgra

2) U narednoj simulaciji je na red sa izvodom primarnog namotaja dodat otpornik reda veličine 75 % otpornosti celog namotaja. Očekuje se da ovaj dodati otpor utiče na dodatno oslabljenje signala, odnosno, pomeranje frekventnog odziva transformatora duž ose magnitude, u odnosu na referentni odziv, i to naročito u zoni niskih frekvencija. Velika vrednost otpornika odabrana je kako bi se izazvale uočljive promene u odzivu koje će na ovaj način nastati. Na slici 13 punom crnom linijom iscrtan je referentni odziv dobijen prilikom napajanja primarnog namotaja sa sekundarnim u kratkom spoju.



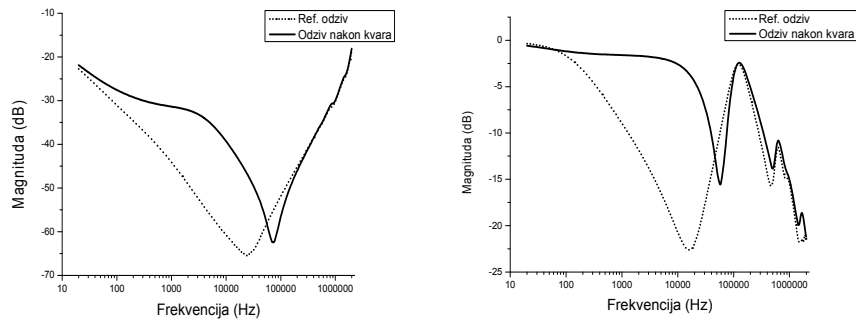
Slika 13. Odziv u sprezi praznog hoda pri dodatom otporu na priključak primara

Radi simulacije deformacije namotaja skinut je izolacioni sloj papira koji se nalazio na spoljnom namotaju.



Slika 14. Namotaji koji su kratko spojeni

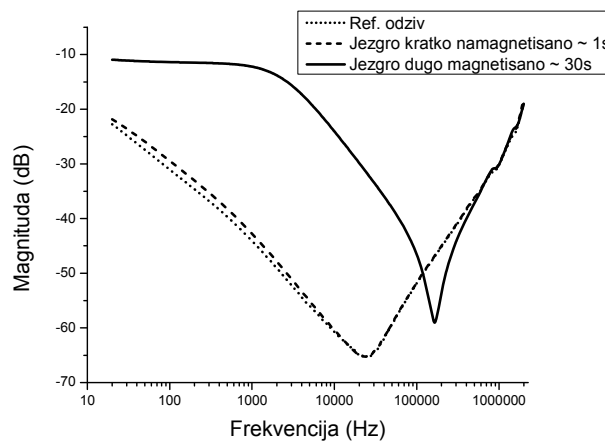
3) Sa svakog od odabrana tri navojka, skinut je deo izolacije, lak. Zatim su ovi ogoljeni delovi žice čvrsto spojeni, zalemljeni, (slika 14). Na ovaj način će



Slika 15. Odzivi: a) pri napajanju sa primarnog namotaja, sekundar otvoren i b) napajanje sa sekundara, primar otvoren

Na slici 15 su prikazani odzivi pri napajanju sa primarne strane i sekundarne strane. Sam odziv je deformisan u odnosu na referentni i pomeren ka višim frekvencijama. Očekivano, odzivi su deformisani, jasno je uočljivo da sa transformatorom nešto nije u redu.

4) U cilju simuliranja zaostalog magnetizma, jezgro transformatora je namagnetisano priključivanjem namotaja primara na bateriju jednosmernog napona 9 V. Zatim je baterija naglo isključena, a pristupilo se snimanju odziva (Slika 16).



Slika 16. Odzivi dobijeni nakon magnećenja jezgra izvorom DC napona

6. Zaključak

Analiza frekventnog odziva transformatora (SFRA) predstavlja izuzetno efikasan merni alat za otkrivanje deformacija aktivnog dela transformatora. Podjednako je pogodna u primeni u fabričkim i laboratorijskim testovima, ali i kao izuzetno značajna metoda za merenje na terenu, zajedno sa ostalim mernim metodama koje su već standardne pri profilaktičkim ispitivanjima. Samo merenje je vrlo jednostavno, neinvazivno i ne primenjuje komplikovane šeme veza. Uz poštovanje nekih osnovnih procedura moguće je, na osnovu grafičkog upoređivanja dobijenih odziva, doneti veoma važne zaključke o stanju geometrije aktivnog dela transformatora. Analiza rezultata za sada je delom subjektivna i zavisi od iskustva ispitivača. Širom sveta se razrađuju matematički algoritmi uz pomoć kojih bi se analiza dobijenih odziva maksimalno automatizovala i smanjila mogućnost subjektivne greške. Metoda je potpuno primenljiva i na generatore, iako je za sada njena primena u toj oblasti prilično skromna.

Upotrebom SFRA merne metode u konjukciji sa tradicionalnim dijagnostičkim metodama obezbeđuje se potpunija procena stvarnog stanja transformatora i osigurava ispravno upravljanje elektroenergetskim resursima u cilju njihove dugovečnosti i blagovremenog otkrivanja uzroka potencijalnih problema.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u okviru projekta TR 33024, „Povećanje energetske efikasnosti, pouzdanosti i raspoloživosti elektrana EPS-a utvrđivanjem pogonskih dijagrama generatora i primenom novih metoda ispitivanja i daljinskog nadzora”, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] C. Sweetser, T. Mcgrail, “Sweep Frequency Response Analysis-Transformer Applications” Doble Engineering, January - 2003.
- [2] Bocovich, Michael “Swept Frequency Response Analysis, Realistic Expectations” Doble Engineering Company – *78th Annual International Doble Client Conference*, Boston, March 2011, Massachusetts, USA.
- [3] Amit Kumar Mehta, R.N.Sharma, Sushil Chauhan, S.D. Agnihotri, „Study And Diagnosis The Failure Of Power Transformer By Sweep Frequency Response Analysis“ *International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, 2013.
- [4] M. Sušić, Đ. Jovanović, S. Marinković, N. Drobnyak, „SFRA metoda, primeri iz prakse i značaj u održavanju energetskih transformatora“ *29. savetovanje, CIGRE Srbija, Zlatibor*, 31. maj– 06.jun 2009.

- [5] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation and Sensors*. Ed. Boca Raton: CRC & IEEE Press, 1999.
- [6] Eileen Duarte, G. Mathew Kennedy, Tony McGrail, „Transformer And Rotating Machine Diagnostics Using Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)“, *74th Annual International Doble Client Conference* 29-30 March 2007, Boston, Massachusetts, USA.
- [7] Luwendran Moodley, BSc. Eng, Brian de Klerk, NHD, eThekweni Electricity, „SFRA as a Diagnostic Tool To Detect Transformer Mechanical Integrity“, *AMEU Convention*, 2006.
- [8] Žan Kiparizoski, Howard Industries, Laurel, MS, USA „SFRA тест за механичка проценkana активниот дел кај енергетски трансформатори“ б. *СОВЕТУВАЊЕ, Мако Cigré*, Охрид, 4– 6. октомври 2009.
- [9] Cigre WG A2.26: Mechanical Condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA), April 2008.
- [10] A. Kratege, M. Krüger, J.L. Velasquez, H.Viljoen, A. Dierks, „Aspects Of The Practical Application Of SFRA On Power Transformer“ *6th Southern Africa Regional Conference*, CIGRÉ 2009.
- [11] Instruction Manual, *Doble SFRA User Guide*, Copyright, 2006, Doble Engineering Company
- [12] S. Tenbohlen, S.A. Ryder, „Making Frequency Response Measurement: A Comparison of the Sweep Frequency and Low Voltage Impulse methods“, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.

Abstract. During regular operation, power transformer windings are continuously exposed to electromechanical stresses and vibrations. Surges during lightning or short circuits may cause the weakening of the mechanical structure and the mechanical reinforcing parts of the core and windings. Any distortion of the projected geometry of the winding will reduce its ability to withstand subsequent overstressing, which can lead to a large deformation of the windings and major system faults. This paper presents an analysis of the frequency response of the transformer windings (Sweep Frequency Response Analysis – SFRA) as a method of determining the integrity of the core and winding geometry. The paper presents the results obtained experimentally and those from field tests on real transformers.

Keywords: analysis of frequency response, power transformer, SFRA, winding deformation.

Power Transformer Geometry Monitoring of Active Parts by SFRA Method

Rad primljen u uredništvo 26.08.2014. godine
Rad prihvaćen 15.09.2014 godine

